

ÜBER DIE ÄNDERUNG
VON WELLENPERIODEN IM BRANDUNGSBEREICH

(Verteilung der Wellenenergie in Brandungsspektren)

von
FRITZ BÜSCHING

Sonderdruck
aus Heft 47 (1975) der Mitteilungen
des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau
der Technischen Universität Braunschweig

CONTENTS

1.	Introduction	125
2.	Field sampling arrangements and data analysis	127
3.	Measuring programs and analyzed time series	129
3.1	Storm surge data of December 13th to 14th, 1973	129
3.2	Simultaneous measurements of January 20th and 23rd, 1974	130
4.	Analysis of the structure of surf spectra	136
5.	Conclusion	146
6.	Summary	151
7.	Abstract (in English)	153
8.	References	154
9.	Appendix: Energy spectra and co-cumulative spectra of the storm surge of December 13th to 14th, 1973	156

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Einleitung	125
2.	Meßbausrüstung und Datenanalyse	127
3.	Analysierte Meßreihen	129
3.1	Sturmflut vom 13./14.12.1973	129
3.2	Synchronmessungen vom 20.1.1974 und vom 23.1.1974	130
4.	Strukturuntersuchung von Brandungs- spektren	136
5.	Schlußfolgerungen	146
6.	Zusammenfassung	151
7.	Abstract (in English)	153
8.	Schrifttum	154
9.	Anhang: Energiespektren und Summenhäufig- keiten der Energiedichte bei der Sturm- flutmessung am 13./14.12.1973	156

1. EINLEITUNG

Bekanntlich können die sich in Brandungszonen abspielenden Energieumwandlungsprozesse nur bedingt im Labor behandelt werden, da das hierbei erzeugte Drei-Phasen-Gemisch (Wasser, Sand und Luft) nicht in ausreichendem Maßstabe nachbildbar ist (Führböter 1970 und 1971).

Aus diesem Grunde sind seit 1971 im Rahmen des von der DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT geförderten Forschungsprogrammes "ENERGIEUMWANDLUNGEN IN BRANDUNGZONEN" umfangreiche Naturuntersuchungen an der Westküste der Nordseeinsel SYLT, vergl. Abb.1, durchgeführt worden.

FOHRBÜTER (1974) untersucht das Verhalten der Wellen in Ufernähe und in der Brandungszone, teilt Ergebnisse bezüglich des Riffeinflusses und der küstenwärtigen Energieabnahme mit und schlägt zur quantitativen Brecherklassifikation eine Kennzahl B vor. DETTE (1974) berichtet über Brandungsströmungen im Bereich hoher REYNOLDS- Zahlen und BOSCHING(1974) über Orbitalgeschwindigkeiten irregulärer Brandungswellen.

Gegenstand der vorliegenden Untersuchung sind die Veränderungen, die infolge von tidebedingt wechselnden bzw. küstenwärts abnehmenden Wassertiefen in Energiespektren des Brandungsseeganges auftreten.

Grundlage für die beabsichtigte Strukturanalyse bilden einerseits Synchronmessungen der Wasserspiegelauslenkung $\eta(t)$, die bei den letztgenannten Untersuchungen des Verfassers während einer schweren Sturmflut vorgenommen wurden, und andererseits zwei weitere Messungen in der daran anschließenden Phase zunehmender Wetterberuhigung.

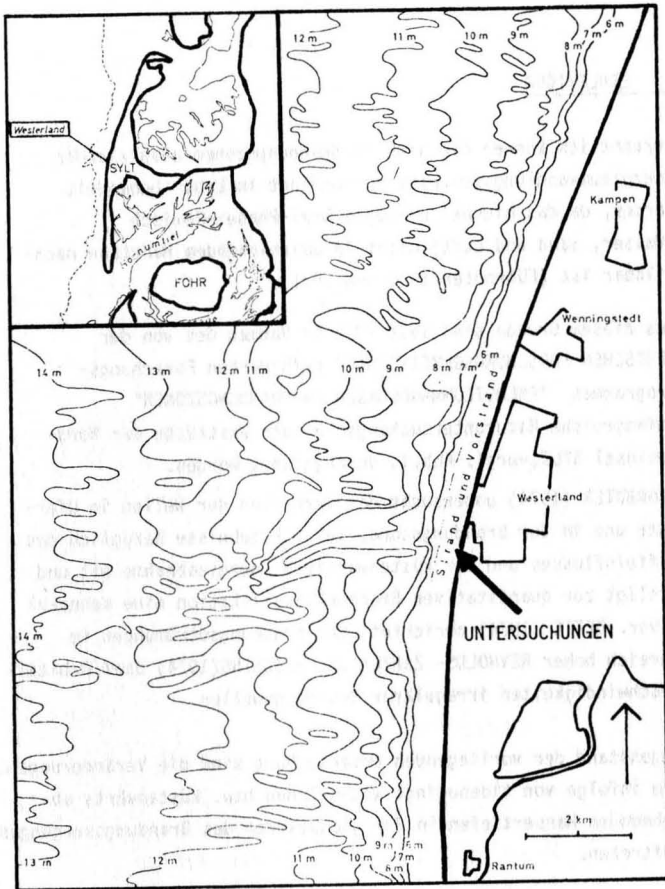


Abb. 1:

Das Untersuchungsgebiet sowie die Unterwassertopografie westlich des Mittelteiles von SYLT (Tiefen bezogen auf SKN). Aufnahme 1967/68 durch Vermessungsschiffe des DHI und des WSA Kiel. Nach KÜSTER (1974)

2. MESSAUSRÜSTUNG UND DATENANALYSE

Für die Messung der Wellen (Wasserspiegelauslenkung $\eta(t)$) waren in einem etwa küstennormalen Meßprofil in unterschiedlichen Abständen vom Dünenfuß (85 m, 100 m, 120 m und 128 m) induktive Flüssigkeitsdruckaufnehmer in etwa 30 cm Höhe über dem im Mittel 1:40 geneigten Strand an Pfählen befestigt.

Während der Sturmflut vom 13./14.12.1973 haben nur die Geräte an Pos. 85 m und an Pos. 100 m gearbeitet, wohingegen bei den folgenden Messungen auch Aufzeichnungen von den beiden weiter seewärts gelegenen Meßstationen an Pos. 120 m und an Pos. 128 m erhalten wurden.

Die betreffenden Messungen wurden jeweils synchron auf Magnetband gespeichert, so daß u. a. die Berechnung von Energiespektren mit Hilfe eines Fourier-Analysators durchgeführt werden konnte. Die Einzelheiten werden von BOSCHING (1974) und von FOHRBÖTER und BOSCHING (1974) beschrieben.

Deswegen sollen hier diesbezügliche Angaben auf die zum Verständnis unbedingt notwendigen Grunddaten für die berechneten Spektren beschränkt werden.

Wegen der gleichzeitig durchgeführten - hier aber nicht behandelten - Analyse von Orbitalgeschwindigkeiten (BOSCHING 1974) ist von einer für Wellenuntersuchungen relativ hohen Maximalfrequenz

$$F_{\max} = F_N = \frac{1}{2 \Delta t} = 3,125 \text{ Hz}$$

ausgegangen worden. Dementsprechend beträgt das Abtastintervall

$$\Delta t = \frac{1}{2 F_{\max}} = \frac{1}{2 \cdot 3,125} = 0,16 \text{ s}$$

Bei der vorhandenen Speichergröße von 16 K konnte für das mit 2 Analogsignalen durchgeführte Rechenprogramm die Blockgröße maximal zu $N = 512$ gewählt werden, so daß sich für die verfügbare Frequenzpunktzahl $N/2$ der zugehörige Frequenzpunktabstand

$$\Delta f = \frac{F_{\max}}{N/2} = \frac{3,125}{256} = 0,012207 \text{ Hz}$$

ergibt.

Die ebenfalls von der Blockgröße abhängige Meßdauer T ist zunächst

$$T'_R = \frac{N}{2 F_{\max}} = \frac{512}{2 \cdot 3,125} = 81,92 \text{ s}$$

Eine für die Analyse von Meereswellen ausreichende Meßdauer $10 \text{ Min} \leq T_R \leq 20 \text{ Min}$ (KAMPHUIS, 1968) wurde dadurch erhalten, daß 10 aufeinanderfolgende Zeitreihen der Dauer $T'_R = 81,92 \text{ s}$ gemittelt wurden:

$$T_R = 10 \cdot 81,92 \text{ s} = 819,2 \text{ s} = 13 \text{ Min.}, 39,2 \text{ s}$$

Da zu erwarten ist, daß die grundsätzlichen Veränderungen beim Vergleich gleichartig berechneter Spektren mit hinreichender Sicherheit erkennbar sind, konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit von einer Genauigkeitsuntersuchung der verwendeten Berechnungsmethode unter Einbeziehung der bei der Spektralanalyse relevanten Einflußfaktoren abgesehen werden.

3. ANALYSIERTE MESSREIHEN

3.1 Sturmflut vom 13./14.12.1973

Wie in der Einleitung erwähnt, sind die bei der Sturmflut erhaltenen Wellenaufzeichnungen bereits zusammen mit Aufzeichnungen der Orbitalgeschwindigkeit Grundlage der o. g. früheren Untersuchungen gewesen.

Dabei wurde u.a. auch der Versuch einer Zuordnung normierter Energiespektren zu den aus Analogaufzeichnungen abgelesenen Brandungserscheinungen unternommen, auf die später noch Bezug genommen werden wird.

Im Gegensatz dazu gehen die vorliegenden Auswertungen von den absoluten Spektren aus. Diese sind den Anlagen 1 bis 16 zu entnehmen. Demnach handelt es sich insgesamt um 32 Spektren, von denen jeweils 2 synchron an Pos. 100 m und an Pos. 85 m aus Einzelmessungen erhalten wurden und zwar zu Meßzeiten, die über die Dauer der Sturmflut (etwa 30 Stunden) unregelmäßig verteilt waren, vgl. BOSCHING (1974). Die jeweiligen Zeitangaben sind in den genannten Anlagen ebenfalls enthalten.

Entsprechend den wind- und tidebedingten Wasserstandsänderungen - es wurden mittlere Windgeschwindigkeiten zwischen 12,5 m/s und 25 m/s (in Böen bis 35 m/s) gemessen - liegen die Spitzenwerte der Energiedichte E_{fp} in den Grenzen

$$0,87 \text{ m}^2/\text{Hz} \leq E_{fp} \leq 4,38 \text{ m}^2/\text{Hz}$$

3.2 Synchronmessungen vom 20.1.1974 und vom 23.1.1974

Bei den Messungen während der Phase abnehmender Wellenintensität handelt es sich um Einzelmessungen, die jeweils synchron an Pos. 128 m, 120 m, 100 m und 85 m vom Dünenfuß entfernt aufgenommen wurden. Es wurden demnach pro Messung 4 Spektren erhalten, die den Abb. 2 und 3 zu entnehmen sind.

Es zeigt sich hier, daß entsprechend der größeren Seegangsintensität (mit Bft. 6) am 20.1.1974 an den seewärtigen Meßpositionen ein wesentlich breiterer Peak als am 23. 1. 1974 bei sehr ruhigem Wetter mit Bft. 3 vorhanden ist.

Andererseits werden aber etwa gleichgroße Zahlenwerte für die maximale Energiedichte erreicht

$$E_{f_p} \approx 1,1 \text{ m}^2/\text{Hz}$$

Mit der Absicht, auch diese Spektren den entsprechenden Wellenverformungen zuzuordnen, sind in Abb. 4 und 5 jeweils die Analogaufzeichnungen zweier benachbarter Meßpositionen derart gegeneinander verschoben worden, daß keine nennenswerte Phasendifferenz mehr vorhanden ist und dementsprechend Veränderungen am besten erkannt werden können. Beim Vergleich der beiden Messungen ergibt sich, daß am 20.1.1974

- a) die Wasserspiegelauslenkungen allgemein dem Betrage nach wesentlich größer waren,
- b) bereits an Pos. 128 m die Wellen eine größere Asymmetrie aufweisen und

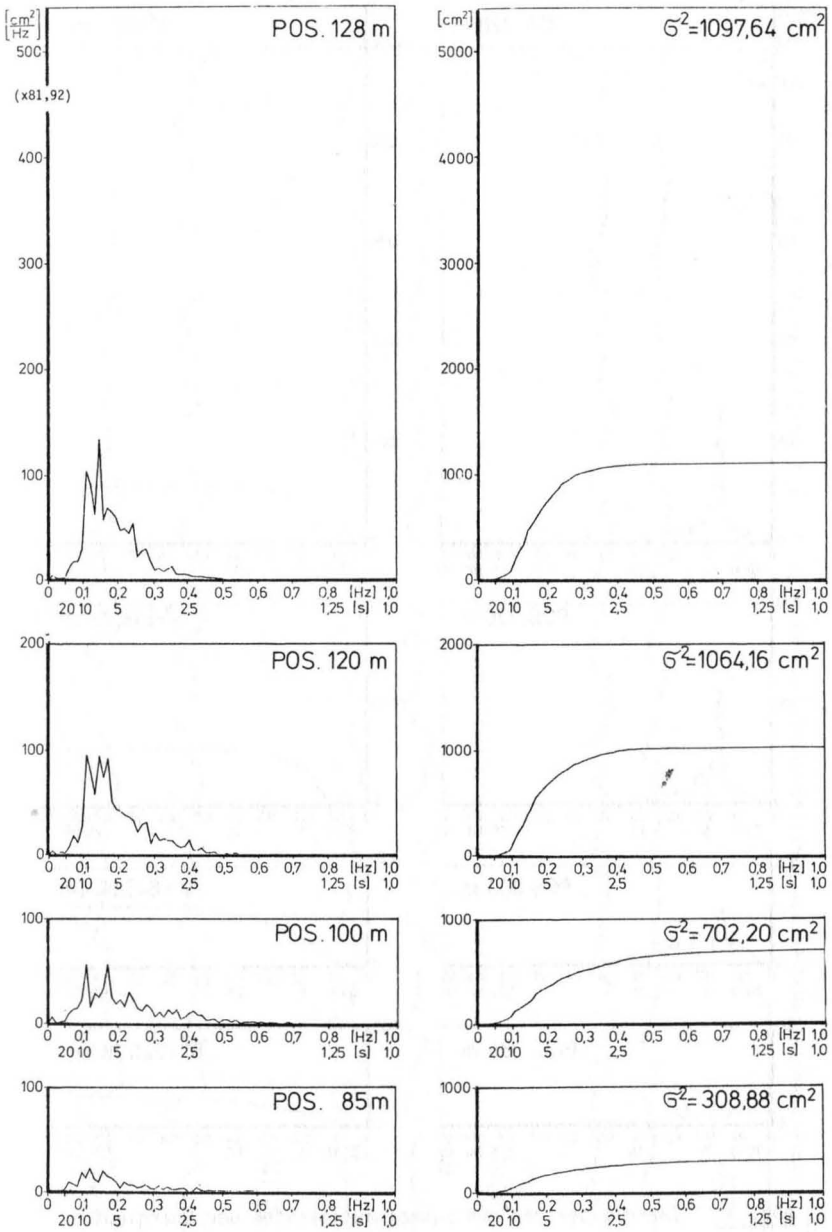


Abb. 2: Energiespektren und Summenhäufigkeiten der Energiedichte
am 20. 1. 1974, 11.44 Uhr

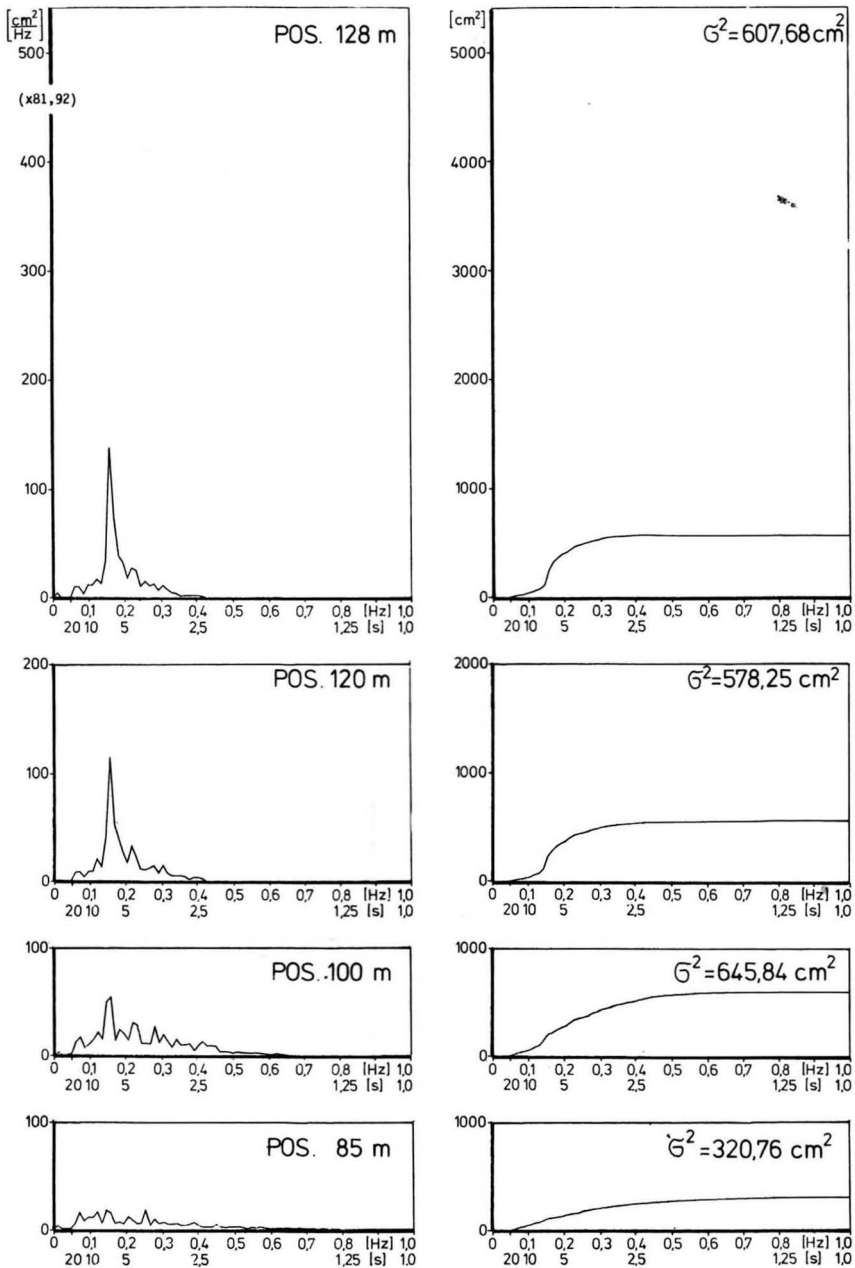


Abb. 3: Energiespektren und Summenhäufigkeiten der Energiedichte
am 23. 1. 1974, 0.55 Uhr

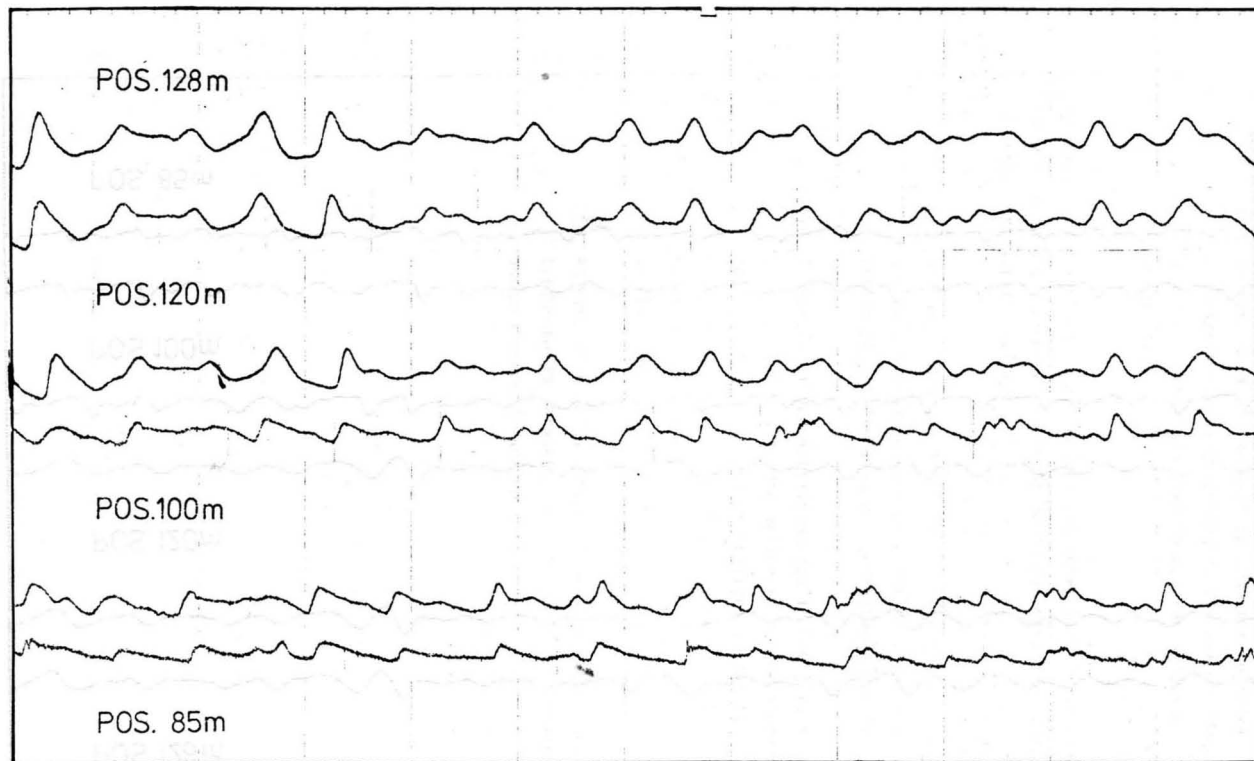


Abb. 4: Synchronaufzeichnungen der Wasserspiegelauslenkung $\eta(t)$ am 20.1.1974, 11.44 Uhr

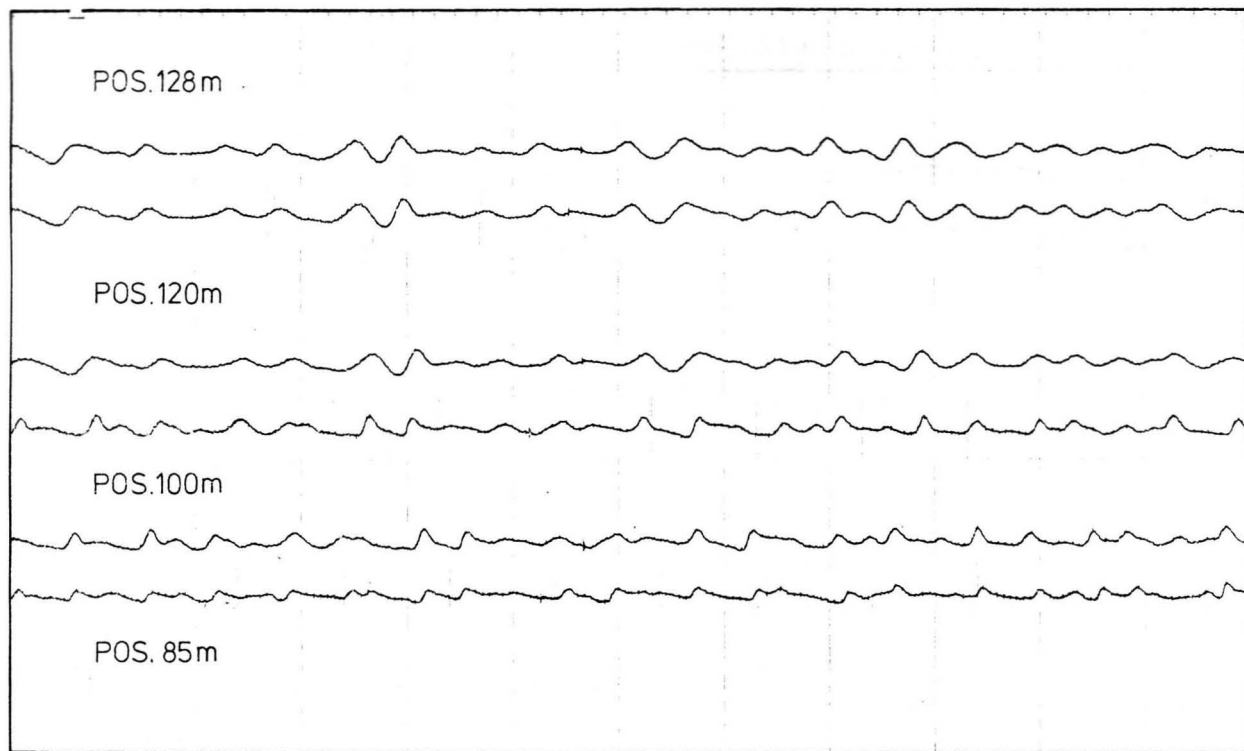


Abb. 5: Synchronaufzeichnungen der Wasserspiegelauslenkung $\eta(t)$ am 23.1. 1974, 0.55 Uhr

- c) an Pos. 85 m mit wesentlich größeren Perioden ausbränden,- eine Erscheinung, die nur mit Mühe aus den zugehörigen Energiespektren abgelesen werden kann.

Hinsichtlich der Verformung der Wellen und ihrer Stabilität im Meßprofil kann gleichermaßen für beide Messungen etwa ähnliches Verhalten festgestellt werden:

- a) An Pos. 128 m und Pos. 120 m sind die jeweiligen Aufzeichnungen noch sehr ähnlich; die Wellen an Pos. 120 m sind nur geringfügig steiler.
- b) Im Vergleich der Aufzeichnungen an Pos. 120 m und Pos. 100 m sind die Wellen an der letzteren Pos. allgemein wesentlich steiler. Es dürfte sich im Durchschnitt um fast brechende Wellen handeln; nur vereinzelt liegen bereits gebrochene Wellen vor.
- c) An Pos. 85 m zeigen wiederum weniger steile Wellenformen im Vergleich zu Pos. 100 m gebrochene und ausbrändende Wellen an.

4. DIE STRUKTUR DER BRANDUNGSSPEKTREN

SIEFERT (1974) hat die Energiedissipation bei begrenzter Wassertiefe mit Hilfe von Energiespektren im Elbmündungsgebiet untersucht. Hinsichtlich der Struktur der Spektren weist er auf die Ergebnisse von WALDEN und RUBACH (1967) und HASSELMANN und COLLINS (1968) hin, die übereinstimmend festgestellt haben, daß die Energiedichte besonders im langwelligen Teil mit zunehmender Energieumwandlung abnimmt und das Maximum (Peak) sich zum kurzwelligen Teil verschiebt.

Nach SONU, PETTIGREW und FREDERICKS (1974) stellt sich für die Wellenauflaufzone genau das Gegenteil heraus: Die Änderung der Auflaufspektren mit zunehmender Entfernung von der Brecherzone läßt einen Tiefpaß-Filter-Effekt des Strandprofiles in der Art erkennen, daß sowohl die Energiedichte bei hohen Frequenzen abnimmt als auch eine Verschiebung des Maximums (bzw. des Schwerpunktes der Maxima) zum langwelligen Teil (red shift) zu Frequenzen weit unter 0,1 Hz erfolgt.

Für die Brecher - und Brandungszone , die den Wassertiefenverhältnissen nach die Verbindung zwischen den oben genannten Arbeiten darstellt, konnte bei den Untersuchungen von BÖSCHING (1974) die Struktur der Energiespektren nur am Rande behandelt werden.

Es ergab sich aber dort bereits aus dem Vergleich normierter Spektren ein Anhalt dafür, daß diese Zone sich auch aus den Erscheinungen in den Spektren als Übergangsgebiet darstellt:

Mit abnehmender Wassertiefe verlagern sich die Spitzenwerte der Energiedichte (Peaks) zu langwelligeren Fourierkomponenten, und zugleich treten Energiedichten bei höheren Frequenzen stärker in Erscheinung.

Für eine weitergehende Strukturuntersuchung ist im Folgenden von den absoluten Spektren sowie von den zugehörigen Summenhäufigkeiten der Energiedichte, die ebenfalls in den Anlagen 1-16 bzw. den Abb.2 und 3 enthalten sind, ausgegangen worden.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen werden nur Auswertungen vorgenommen, mit deren Hilfe die Struktur von Brandungsspektren qualitativ besser interpretiert werden können. Quantitative Aussagen über die Energieumwandlung unter Berücksichtigung der verschiedenen Wechselwirkungsprozesse sind auch hier vorerst nicht beabsichtigt.

In diesem Zusammenhang sei nur auf das Verhältnis der Kenndaten für die Sturmflutmessung zu denjenigen der übrigen beiden Messungen hingewiesen:

Sowohl der maximal auftretende Spitzenwert der Energiedichte $\max E_{fp}$ als auch die maximal vorhandene Varianz $\max \sigma^2$ betragen mit

$$\begin{aligned}\max E_{fp} &= 4,3817 \text{ m}^2/\text{Hz} \text{ und} \\ \max \sigma^2 &= 0,5278 \text{ m}^2\end{aligned}$$

(vgl. Anl. 10 und 11) jeweils ein Vielfaches der betreffenden Werte bei den Messungen am 20.1.1974 und am 23.1.1974.

Aus den Auftragungen der Summenhäufigkeiten ist bereits erkennbar, daß im dargestellten Frequenzbereich $0 \leq f \leq 1,0$ Hz im allgemeinen unterschiedliche Prozentsätze des jeweils in der rechten oberen Ecke angegebenen Zahlenwertes für die über den Frequenzbereich $0 \leq f \leq 3,125$ Hz berechnete Varianz σ^2 (Energie) erreicht werden. Dieser Erscheinung ist mit den Darstellungen Abb. 6, 7, 8 und 9 weiter nachgegangen worden:

In Abb. 6 wurde dazu für beide Meßpositionen die Varianz

$$\sigma^2 = \int_0^{f_1} G_{\eta\eta}(f) df \quad (\text{für 7 verschiedene Frequenzbereiche } 0 \leq f \leq f_1)$$

aufgetragen.

Die charakteristischen Veränderungen werden nachfolgend unter Verwendung der Kurvenzüge ①, ③ und ⑥ der Funktion $\sigma^2 = f(t)$ aufgezeigt:

A. Frequenzbereich $0 \leq f \leq 3,125$ Hz (Kurve ①)

Es wird deutlich, daß der an Pos. 100 m ausgeprägte Zusammenhang zwischen Wellenenergie und Wasserstand 15 m küstenwärts (an Pos. 85 m) bedeutend schwächer ist:

Während an Pos. 100 m hoher Tidewasserstand durchweg gleichbedeutend mit hoher Wellenenergie ist, ist an Pos. 85 m dieser Zusammenhang in der Art gestört, daß während der Untersuchungsdauer mit 3 Hochwasserständen

- a) 5 Energiemaxima auftreten und
- b) der Maximalwert der Energie etwa am Ende des Untersuchungszeitraumes bei sehr geringem Tidewasserstand erreicht wird.

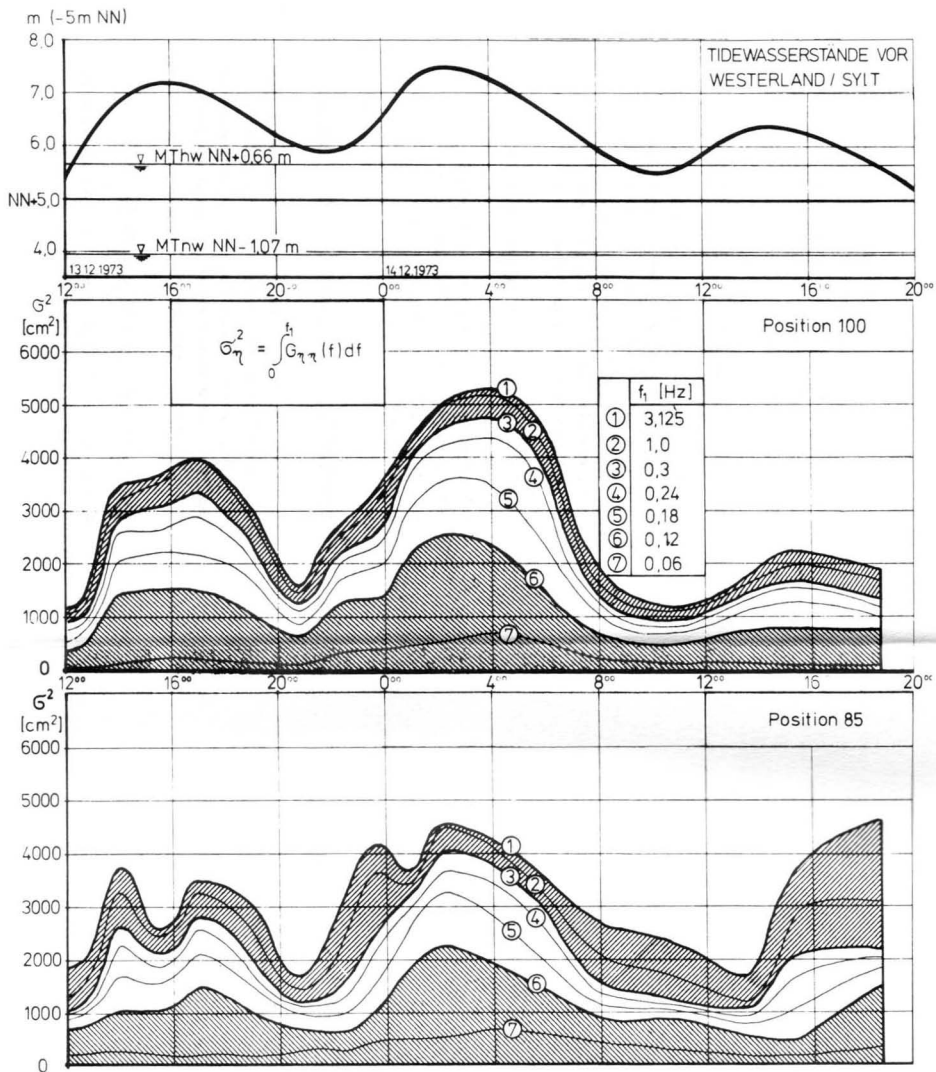


Abb. 6: Wellenenergie $\sigma^2 = \int_0^{f_1} G_{\eta\eta}(f) df$ während des Untersuchungszeitraumes

Bei dem Vergleich der entsprechenden Kurven ① an Pos. 100 m und 85 m fällt auf, daß insbesondere zu Zeiten, in denen der Tidepegel niedrige Wasserstände anzeigt, im betrachteten Frequenzband an Pos. 85 m höhere Wellenenergien gemessen wurden als an Pos. 100 m.

B. Frequenzbereich $0 \leq f \leq 0,3$ Hz (unterhalb Kurve ③)

Hinsichtlich der Beziehung der im vorliegenden Frequenzband auftretenden Energien zu den Tidewasserständen ist nunmehr auch an Meßposition 85 m eine stärkere Tendenz zur Angleichung in der Art erkennbar, daß die Energiemaxima etwa gleichzeitig mit und dem Betrage nach in der richtigen Relation zu den Tidewasserständen auftreten.

Lediglich zu Beginn des Meßzeitraumes ist ein zusätzliches Energiemaximum vorhanden.

Bei dem Vergleich der entsprechenden Kurven ③ an Pos. 100 m und 85 m ist festzustellen, daß nur noch gegen Ende der Meßzeit die Energie an Pos. 85 m höher ist als an Pos. 100 m.

C. Frequenzbereich $0,3 \leq f \leq 3,125$ Hz (oberhalb Kurve ③)

An Pos. 85 m ist der auf Frequenzen $f \geq 0,3$ Hz entfallende Energieanteil größer oder mindestens gleich demjenigen an Pos. 100 m. Insbesondere am Ende des Untersuchungszeitraumes ist der betreffende Energieanteil größer als die Hälfte der insgesamt vorhandenen Energie.

D. Frequenzbereich $0 \leq f \leq 0,12$ Hz (Kurve ⑥)

Auch der zu ausschließlich langwelligen Fourierkomponenten ($T > 8$ s) gehörige Energieanteil läßt während der Unter-

suchungsdauer an Pos. 100 m die Beziehung zu den Wasserständen erkennen.

Dasselbe trifft auch an Meßposition 85 m für die Untersuchungsdauer bis etwa 8.00 Uhr am 14.12.1974 zu. Anschließend treten hier aber Veränderungen in der Art auf, daß

- a) die Energie gerade zur Zeit des 3.Hochwassers ein Minimum erreicht und
- b) sowohl vor als auch nach diesem Hochwasser - wie in den vorher betrachteten Frequenzbändern - im Vergleich zu Pos. 100 m höhere Energien vorhanden sind.

Abb. 7 enthält für beide Meßpositionen die prozentuale Verteilung der während des Untersuchungszeitraumes jeweils vorhandenen Energie

$$\sigma^2 = \int_0^{f_1} G_{nn}(f) df$$

Dargestellt wurde hier nur der Frequenzbereich $0 \leq f \leq 1$ Hz. Zur besseren Übersicht sind 3 Frequenzbereiche kenntlich gemacht, die durch die 50 %- Linie und die 90%- Linie begrenzt sind.

Werden zunächst die Frequenzbänder betrachtet, in denen 50 % der Energie enthalten ist, so ergibt sich, daß dieser Prozentsatz der Energie an Pos. 100 m etwa konstant bei einer Frequenz deutlich unter 0,2 Hz erreicht wird. Eine Beziehung zu den Tidewasserständen ist nicht erkennbar. Im Gegensatz dazu liegt die entsprechende Frequenz an Pos. 85 m im allgemeinen höher und erreicht bei niedrigen Tidewasserständen Spitzenwerte $f > 0,3$ Hz.

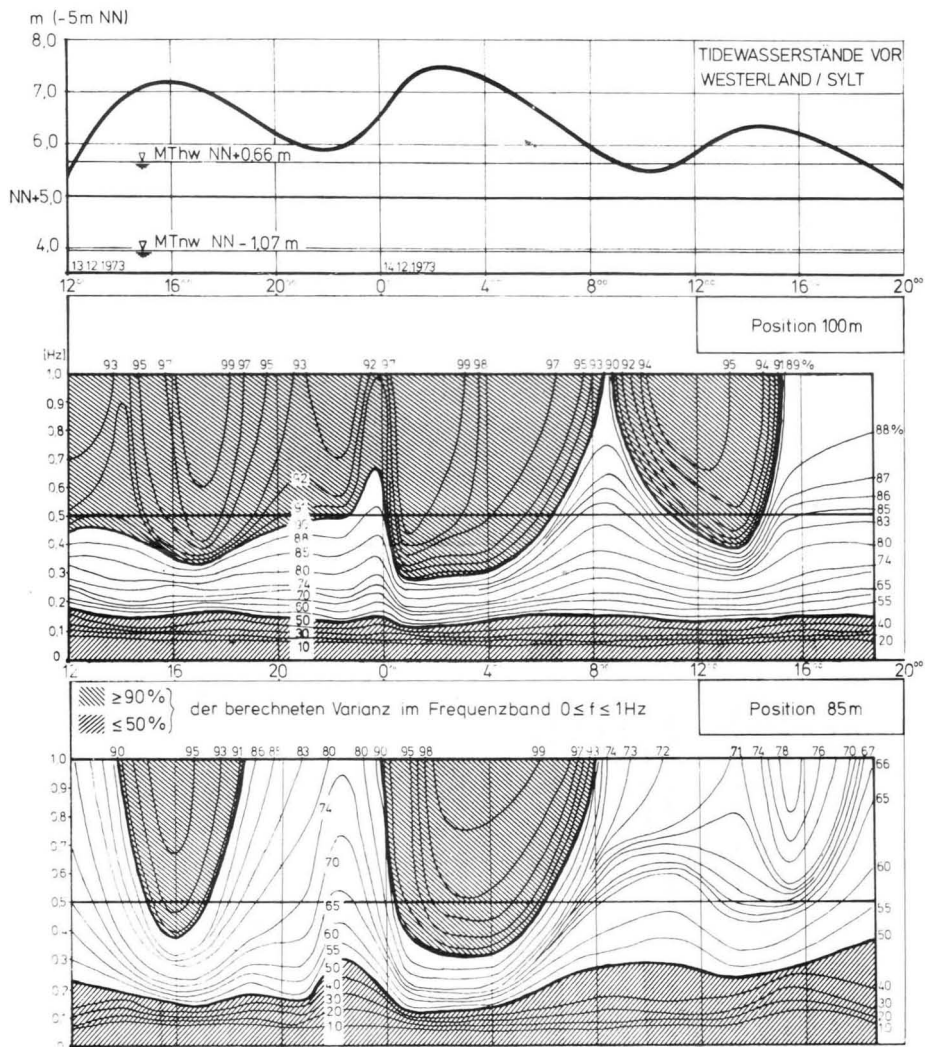


Abb. 7: Prozentuale Verteilung der während des Untersuchungszeitraumes jeweils vorhandenen

$$\text{Energie } \sigma^2 = \int_0^{3,125 \text{ Hz}} g_{nn}(f) df \text{ im Frequenzbereich } 0 \leq f \leq 1 \text{ Hz}$$

Die 90 %- Linie zeigt an Pos. 100 m ebenfalls noch keine eindeutige Beziehung zu den Tidewasserständen; 90 % der Energie und mehr treten sowohl bei hohen als auch bei niedrigen Tidewasserständen im Frequenzband $0 \leq f \leq 1$ Hz auf.

Dagegen wird die vermutete Beziehung zu den Tidewasserständen besonders deutlich an Pos. 85 m: 90 % der vorhandenen Energie und mehr entfallen auf Fourierkomponenten des dargestellten Frequenzbandes $0 \leq f \leq 1$ Hz tatsächlich erst bei ausreichend hohen Wasserständen (1. und 2. Thw).

Für die beiden mit jeweils 4 Flüssigkeitsdruckgebern in der Phase zunehmender Wetterberuhigung durchgeführten Synchronmessungen wurden die Auswertungen in ähnlicher Art wie für die Sturmflutmessung vorgenommen - nur mit dem Unterschied, daß sowohl die vorhandene Energie als auch ihre prozentuale Verteilung als Funktion vom Strandabstand aufgetragen wurde, vgl. Abb. 8 und 9.

Bei der Messung vom 20.1.1974 ist an Pos. 128 m fast die gesamte Energie (mehr als 99 % von $\sigma^2 = 1097,64 \text{ cm}^2$) im Frequenzband $0 \leq f \leq 0,5$ Hz vorhanden und nimmt mit Annäherung an den Strand kontinuierlich ab.

Am 23. 1. 1974 ist sie an derselben Meßposition und im selben Frequenzband mit rd. 94 % von $\sigma^2 = 607,68 \text{ cm}^2$ nur etwa halb so groß. Dazu ist die bei der Sturmflutmessung aufgetretene Erscheinung der küstenwärtigen Energiezunahme insbesondere bei höherfrequenten Fourierkomponenten auch hier zu beobachten: Der Maximalwert der Energie tritt bei dieser Messung etwa an der Meßposition 100 m auf.

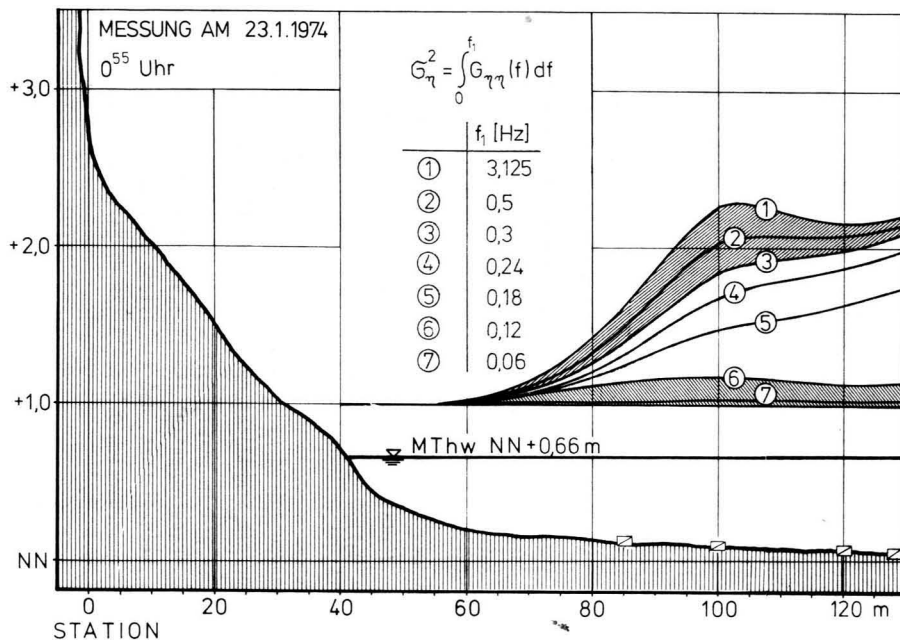
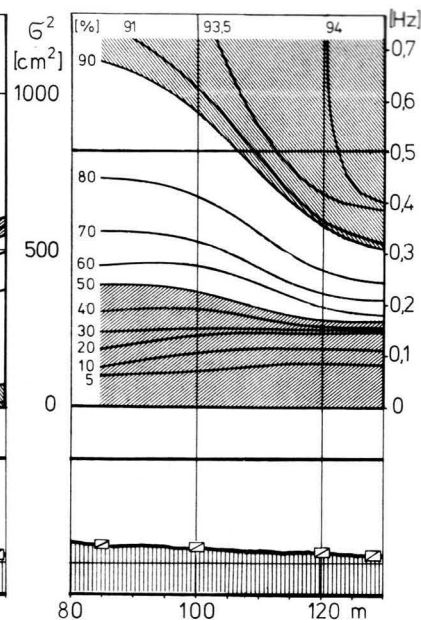


Abb. 9: Wellenenergie $\sigma^2 = \int_0^{f_1} G_{\eta\eta}(f) df$ im Meßprofil
am 23. 1. 1974, 0.55 Uhr



Zugehörige prozentuale
Verteilung der Wellenenergie
im Frequenzband $0 \leq f \leq 0,78$ Hz

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Bezüglich der Sturmflutmessungen vom 13./14.12.1973 ist die Verbindung zwischen den vorliegenden Auswertungen und den früher mitgeteilten (BÜSCHING, 1974) u. a. dadurch hergestellt, daß die aus den Analogaufzeichnungen abgelesenen Brandungserscheinungen offenbar mit der prozentualen Verteilung der im Frequenzband $0 \leq f \leq 3,125$ Hz jeweils vorhandenen Energie $\sigma^2 = \int_0^{3,125 \text{ Hz}} G_{nn}(f) df$, vergl. Abb. 7, in Zusammenhang stehen.

Generell ist die jeweils vorhandene Energie bei geringeren Tidewasserständen über ein weiteres Frequenzband verteilt.

Diese Aussage steht in Übereinstimmung

- a) mit dem Ergebnis einer bereits von SCHULEJKIN (1956) durchgeführten theoretischen Untersuchung, bei der er feststellte, daß für die Fourierdarstellung einer küstenwärts zunehmend verformten (steiler werdenden) Welle die Energie der (benötigten) Oberschwingungen auf Kosten derjenigen der Grundschiwingung (Sinus - Welle) zunimmt und andererseits
- b) mit dem von GALVIN (1972) im Labor beobachteten Zerfall der Ursprungswelle in mehrere kürzere Wellen, den sogenannten SOLITONS.

Für die betreffenden intensiven Sturmflutverhältnisse kann folgende Feststellung über die Stabilität der Wellen gemacht werden:

Energiespektren stabiler Wellen sind dadurch gekennzeichnet, daß mindestens 90 % der für den Frequenzbereich $0 \leq f \leq 3,125$ Hz berechneten Varianz

Fourierkomponenten mit Frequenzen $0 \leq f \leq 0,5$ Hz zugeordnet sind.

Mit zunehmender Verteilung der Energiedichte auf höhere Frequenzen vollzieht sich der Übergang über brechende zu ausbrandenden Wellen.

Diese Feststellung gilt offenbar auch für die Messung am 20.1.1974 (vgl. Abb. 8), wohingegen die Stabilität der Wellen nach diesem Kriterium am 23. 1. 1974 (bei Seegang mit wesentlich geringerer Intensität) bereits seewärts von Pos. 100 m eingetreten sein müßte, vgl. Abb. 9. In diesem Falle wäre die in Abschnitt 3 gegebene Interpretation der Wellenverformung dahingehend zu korrigieren, daß es sich bereits an Pos. 100 m um brechende Wellen - etwa in der Form von Schwallbrechern - gehandelt hat.

Hinsichtlich der zeitweise auftretenden Erscheinung der küstenwärtigen Energiezunahme ist klar, daß es sich dabei im wesentlichen um den Energieanteil höherfrequenter Fourierkomponenten mit Frequenzen $f \geq 0,3$ Hz handelt, die bei relativ niedrigen Wasserständen besonders hervortreten.

Eine Abweichung davon ist nur bei den Minimalwasserständen vor und nach dem letzten Tidehochwasser der Sturmflut in der Art vorhanden, daß außerdem im langwelligen Frequenzbereich $0 \leq f \leq 0,12$ Hz ein Energiezuwachs auftritt.

Letzterer steht offenbar in Übereinstimmung mit dem von SONU (1974) und BOSCHING (1974) unabhängig voneinander erhaltenen Ergebnis, daß die Verlagerung der Spitzenwerte der Energiedichte (Peaks) im Energiespektrum zu niedrigen Frequenzen mit küstenwärts bzw. tidebedingt abnehmender Wassertiefe einhergeht. Diese Erscheinung ist einleuchtend, da die küstenwärtige Wellenverformung schließlich in den langperiodischen Auf-
laufschwall einmündet.

Auf die Ursache der Energiezunahme bei hochfrequenten Fourierkomponenten an Positionen küstenwärts der Brecherzone soll nachfolgend näher eingegangen werden:

Sicherlich ist der Rauschanteil bei Sensoren, die an der unteren Grenze ihres Nennlastbereiches arbeiten, größer, so daß im vorliegenden Fall bei niedrigen Wasserständen hieraus auch ein größerer prozentualer Anteil der vorhandenen Varianz resultiert.

Aus den Auftragungen der Summenhäufigkeiten wird aber deutlich, daß dieser Effekt offenbar nur bei minimaler Wasserüberdeckung und zwar am Ende der Sturmflutmessung an Pos. 85 m (vgl. Anl. 16) die entscheidende Rolle gespielt hat. Nur hier ist die Differenz zwischen der im Frequenzband $0 \leq f \leq 1$ Hz erreichten Varianz $\sigma^2 \approx 3000 \text{ cm}^2$ und dem für den Frequenzbereich $0 \leq f \leq 3,125$ Hz berechneten Zahlenwert $\sigma^2 = 4528,80 \text{ cm}^2$ so groß, daß im hochfrequenten Bereich ($f > 1$ Hz) ein weiterer Peak aufgetreten sein kann.

Für die übrigen Messungen ist aber der Grund für die küstenwärtige Energiezunahme im Brandungsmechanismus selbst zu suchen.

Die Unterwassertopografie vor Sylt (Abb. 1) zeigt seewärts des etwa 400 m vor der Küste befindlichen Sandriffes auf der Höhe des mit Pfeil gekennzeichneten Untersuchungsgebietes einen sich etwa küstennormal mehrere Kilometer erstreckenden Rücken, dessen Oberfläche etwa auf SKN-8 m liegt.

Wegen der großen Ausdehnung dieses Rückens kann nun vermutet werden, daß sich die durch diesen verursachte Refraktion noch in unmittelbarer Küstennähe - also landwärts des Riffes - bemerkbar macht:

Einmal könnten hierdurch die vom Verfasser an Pos. 100 m bei vorwiegend ungebrochenen Wellen ungewöhnlich hoch erhaltenen Werte für den Brandungsstau ($\overline{\Delta z} = 0,66 \text{ m}$) (BOSCHING 1974) erklärt werden

und zum anderen ist denkbar, daß die Wellen zu einem Brennpunkt hin ausbranden, dessen Lage im Meßprofil vom vorliegenden Tidewasserstand abhängig ist.

Eine im Brennpunkt gegenüber seewärtigen Meßpositionen erhöhte Energie ist dann in der Art vorstellbar, daß hier ausbrandende Wellen mit nur wenig voneinander abweichenden Fortschrittsrichtungen aufeinandertreffen oder übereinander ausbranden (Kreuzbrandung); eine Erscheinung, die des öfteren im Untersuchungsgebiet beobachtet werden konnte.

Dementsprechend müßte sich ein solcher Brennpunkt bei der Messung am 23.1. 1974 etwa bei Pos. 100 m befunden haben, während wegen des höheren Tidewasserstandes am 20.1.1974 ausbrandende Wellen erst küstenwärts von Pos. 85 m aufeinandergetroffen sind und demnach von den Flüssigkeitsdruckgebern nicht mehr erfaßt wurden.

Wird der Frage nach der Intensität der beteiligten Wellen aus südlichen und nördlichen Richtungen nachgegangen, so läßt sich wiederum eine Verbindung zu den früheren Untersuchungsergebnissen des Verfassers herstellen:

In Abb. 10 ist für die Sturmflut vom 13./14. 12. 1973 die an Pos. 85 m aus den horizontalen Orbitalgeschwindigkeiten berechnete resultierende Wellenanlaufrichtung (BOSCHING 1974) als Kurvenzug über den Meßzeitraum - zusammen mit einer Ausgleichskurve, die in etwa auch die Änderung der Windrichtung beschreibt - dargestellt.

Bei den genannten Untersuchungen war bereits der wechselhafte Verlauf dieser Funktion aufgefallen und ein Zusammenhang mit dem Tideverlauf oder tideerzeugten Strömungen vermutet worden. Es stellt sich nun heraus, daß die Abweichungen von der Ausgleichskurve für den Meßzeitraum bis etwa 8.00 Uhr am 14.12.1973, in dem der langwellige Auflaufschwall kaum einen Anteil zu der vorhandenen Energie beigetragen haben dürfte, mit den Extremwerten der Funktion $\sigma^2 = f(t)$ (Kurve ①, Abb. 6, für $0 \leq f \leq 3,125$ Hz) synchron verlaufen.

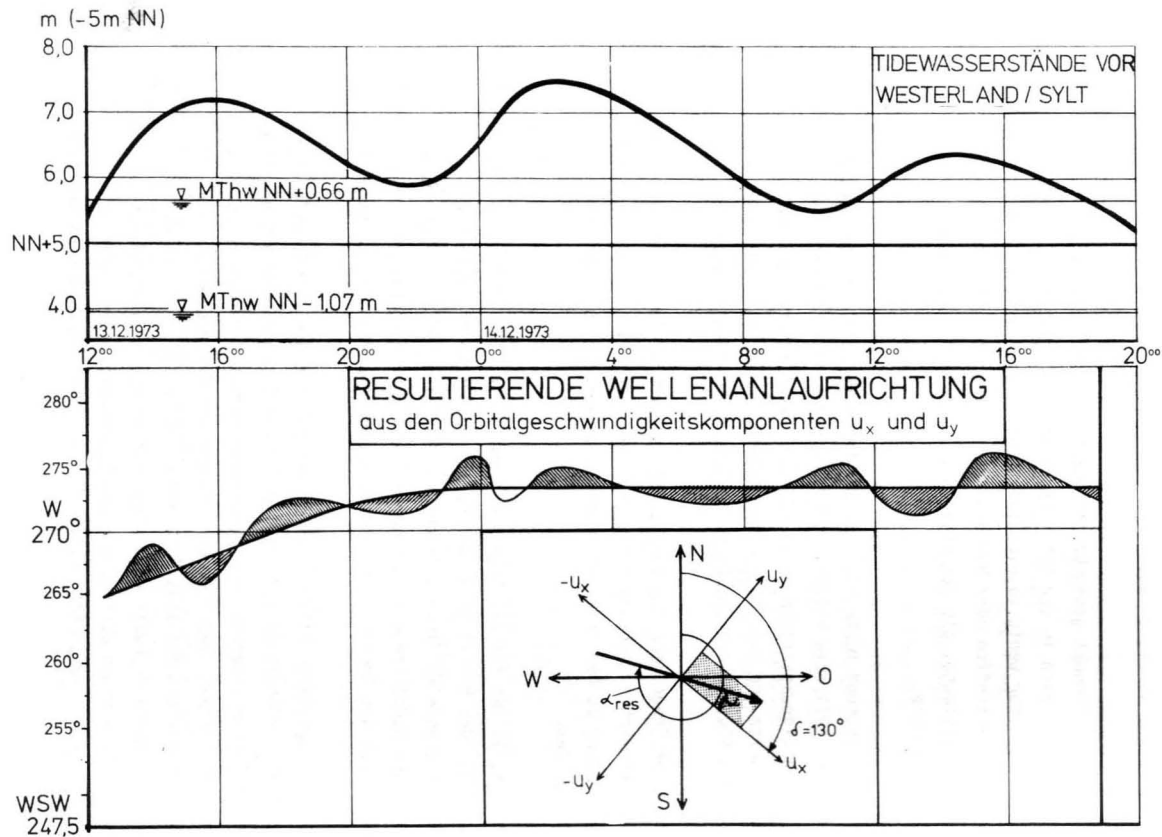


Abb. 10: Änderungen der resultierenden Strömungsrichtungen infolge wechselnder Intensitäten bei den

Da sich diese Übereinstimmung auch für den Untersuchungszeitraum nach 8.00 Uhr ergeben würde, wenn der dem hier vorhandenen Aufschwung zuzuordnende langwellige Energieanteil und der oben erwähnte erhöhte Rauschanteil am Ende des Meßzeitraumes im Spektrum unberücksichtigt bliebe, kann gefolgert werden, daß die angezeigten Richtungsänderungen aus den unterschiedlichen Intensitäten der beteiligten aufeinandertreffenden (oder übereinander) ausbrandenden Wellen resultieren.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Grundlage der Untersuchungen sind Synchronmessungen der Wasserspiegelauslenkung $\eta(t)$, die während einer schweren Sturmflut und in der daran anschließenden Periode zunehmender Wetterberuhigung auf der Insel SYLT/Nordsee im Winter 1973/74 in einem Meßprofil in der Brandungszone über einem etwa 1:40 geneigten Strand gewonnen wurden.

Unter Verwendung eines FOURIER ANALYSATORS sind insgesamt 40 Energiespektren des Brandungsseeganges berechnet und deren Veränderungen analysiert worden. Dabei wurde von der Integralkurve der Spektren (Summenhäufigkeiten der Energiedichte) ausgegangen.

Die Ergebnisse sind im einzelnen:

1. Mit küstenwärts bzw. tidebedingt abnehmender Wassertiefe verteilt sich die Energiedichte im Brandungsspektrum über ein weiteres Frequenzband.
2. Energiespektren stabiler Wellen sind dadurch gekennzeichnet, daß mindestens 90 % der für den Frequenzbereich $0 \leq f \leq 3,125$ Hz berechneten Varianz Fourierkomponenten mit Frequenzen $0 \leq f \leq 0,5$ Hz zugeordnet sind.

Mit zunehmender Verteilung der Energiedichte auf höhere Frequenzen vollzieht sich der Übergang über brechende Wellen zu ausbrandenden Wellen.

3. Die zeitweilig etwa in Abhängigkeit vom Tideverlauf auftretende Erscheinung einer höheren Wellenenergie küstenwärts der Brecherzone als in der Brecherzone selbst wird mit Refraktionseffekten ausbrandender Wellen (Kreuzbrandung) erklärt.

7. ABSTRACT

The investigations under consideration are based on measurements of synchronous waterlevel deflections $\eta(t)$ at some positions in a beach profile with a slope of approximately 1:40.

Surf conditions are studied during a severe storm surge as well as during periods of attenuating wave action.

By the use of a FOURIER ANALYZER 40 energy spectra are calculated which are also presented in integrated form (co - cumulative spectra).

Because of different site arrangements it is possible to analyze the deformation of the spectra due to tidal dependent water depth as well as due to coastward decreasing water depth.

It happens that there are some phenomena associated to certain frequency bands.

With the water depth decreasing the energy densities in surf spectra are distributed over a wider frequency band.

In the present case unbroken waves are characterized by energy spectra in which at least 90 % of the energy is represented by FOURIER components in the frequency range $0 \leq f \leq 0,5$ Hz. Increasing distribution of the energy densities over a wider frequency band represents breaking and finally broken waves.

Sometimes the amount of energy coastward of the breaker zone is higher than inside the breakers. This phenomenon can be explained by refraction effects caused by local nearshore bathymetry.

8. SCHRIFTTUM

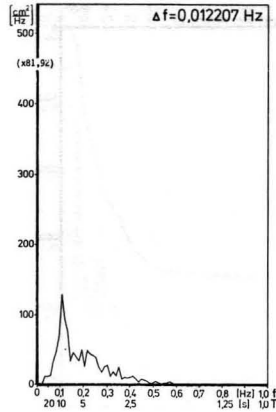
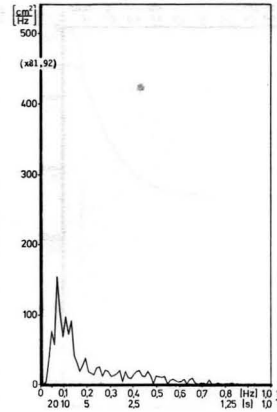
- BOSCHING, F.
1974
Ober Orbitalgeschwindigkeiten
irregulärer Brandungswellen,
Mitt. LEICHTWEISS-INSTITUT der
Technischen Universität
Braunschweig, Heft 42.
- DETTE, H.H.
1974
Über Brandungsströmungen im Be-
reich hoher REYNOLDS-Zahlen
Mitteilungen des Leichtweiß-
Instituts für Wasserbau der
Technischen Universität Brschw. g.
Heft 41.
- FOHRBÖTER, A.
1970
Air Entrainment and Energy
Dissipation in Breakers
Proc. XIIth Coastal Engineering
Conference Washington, 1970
- FOHRBÖTER, A.
1971
Über die Bedeutung des Luftein-
schlages für die Energieumwand-
lung in Brecherzonen
a) Mitt. Franzius-Institut
TU Hannover, Heft 36, 1971
b) Die Küste, Heft 21, 1971
- FOHRBÖTER, A.
1974
Einige Ergebnisse aus Naturunter-
suchungen in Brandungszonen
Mitteilungen des Leichtweiß-Insti-
tuts für Wasserbau der TU Brschw. g.
Heft 40, 1974
- FOHRBÖTER, A.
BOSCHING, F.
1974
Wave Measuring Instrumentation
for Field Investigations on Brea-
kers. OCEAN WAVE MEASURING AND
ANALYSIS, Volume I, New Orleans;
USA 1974, Published by ASCE New York

- GALVIN, C.J.Jr.
1972
Wave Breaking in Shallow Water
in "Waves on Beaches", edited
by R.E. Meyer, Academic Press,
Inc. New York and London, 1972
- HASSELMANN, K.,
COLLINS, J.I.:
1968
Spectral Dissipation of Finitedepth
Gravity Waves Due to Turbulent
Bottom Friction. Journal of Mar.
Res., Vol. 26, No. 1, 1968
- KAMPHUIS, J.W.
1969
Introduction to Wave Spectrum
Analysis
Department of Civ. Eng., Queen's
Univ. Kingston, Ontario
C.E. Research, Report No. 64, Nov. 1969
- KÖSTER, R.
1974
Geologie des Seegrundes vor den
Nordfriesischen Inseln Sylt und
Amrum. MEYNIANA 24
S.27-41, Kiel
- SCHULEJKIN, W.W.
1960
Theorie der Meereswellen
Akademie-Verlag Berlin 1960
- SIEFERT, W.
1974
Ober den Seegang in Flachwasserge-
bieten, Mitteilungen des Leichtweiß-
Instituts für Wasserbau der TU Braun-
schweig Heft 40, 1974
- SONU, C. J.,
PETTIGREW, N. und
FREDERICKS, R.G.
1974
Measurement of Swash Profile and
Orbital Motion on the Beach.
Proc. International Symp. OCEAN WAVE
MEASUREMENT AND ANALYSIS
Sept. 9-11. 1974, New Orleans,
Louisiana, USA.
- WALDEN, H.,
RUBACH, H.J.:
1967
Gleichzeitige Messungen mit nicht-
stabilisierten Beschleunigungs-
schreibern an Orten mit unterschied-
licher Wassertiefe in der Deutschen
Bucht. Dt. Hydrogr. Zeitschrift, Bd. 20,
H. 4, 1967

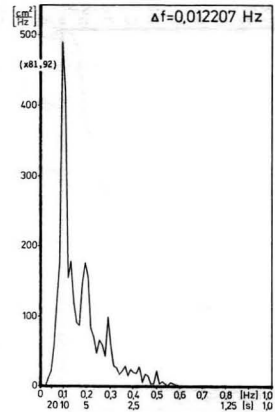
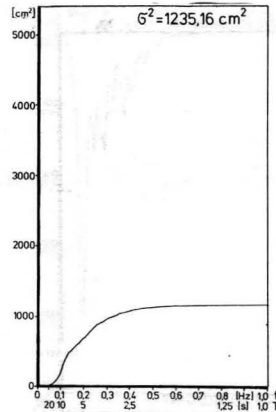
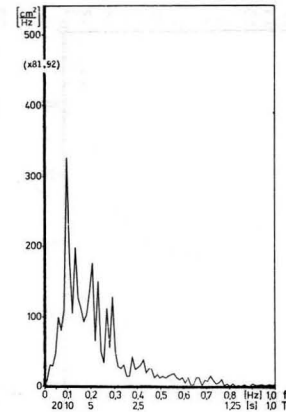
9. ANHANG

Energiespektren und Summenhäufigkeiten
der Energiedichte der Sturmflutmessung
am 13./14. 12. 1973

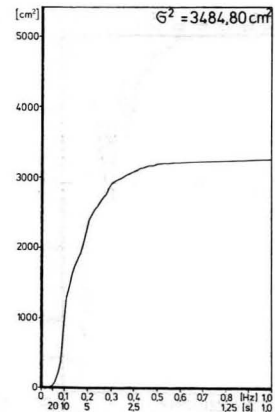
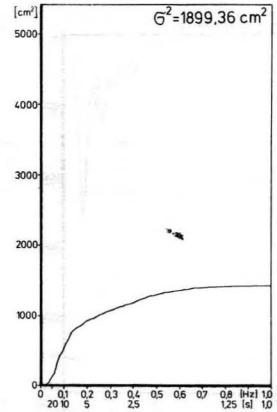
ANL. 1

POS. 100m I. 1 1312.1973 ENERGIESPEKTREN 12³⁰ POS. 85m II. 1

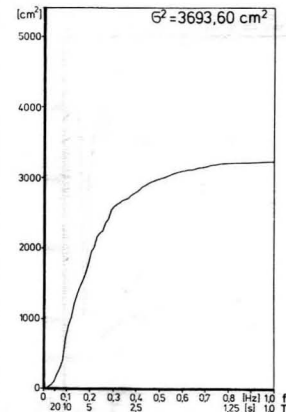
ANL. 2

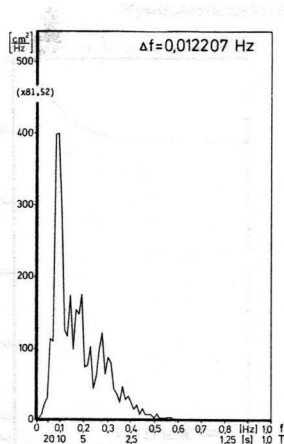
POS. 100m I. 2 1312.1973 ENERGIESPEKTREN 14⁰⁰ POS. 85m II. 2

SUMMENHÄUFIGKEITEN DER ENERGIEDICHTE

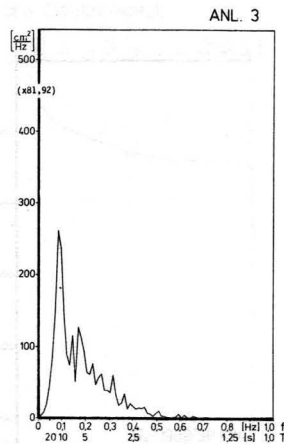


SUMMENHÄUFIGKEITEN DER ENERGIEDICHTE

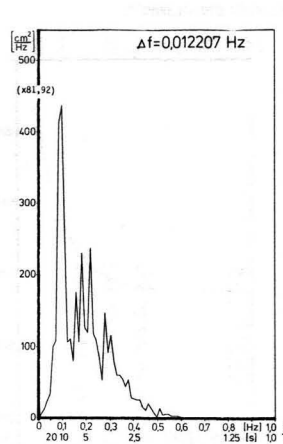




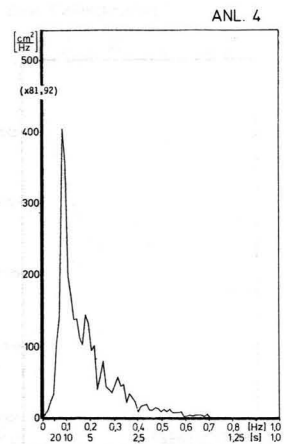
POS. 100m I.3 13.12.1973 ENERGIESPEKTREN 15³⁰



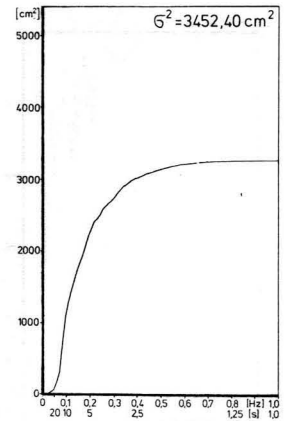
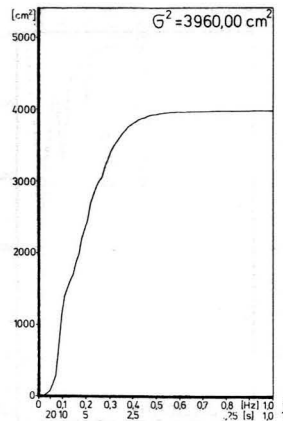
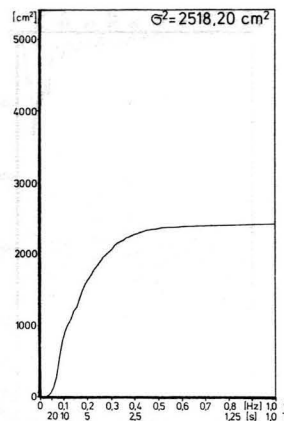
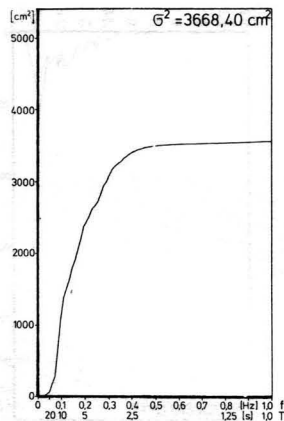
POS. 85m II.3



POS. 100m I.4 13.12.1973 ENERGIESPEKTREN 17⁰⁰

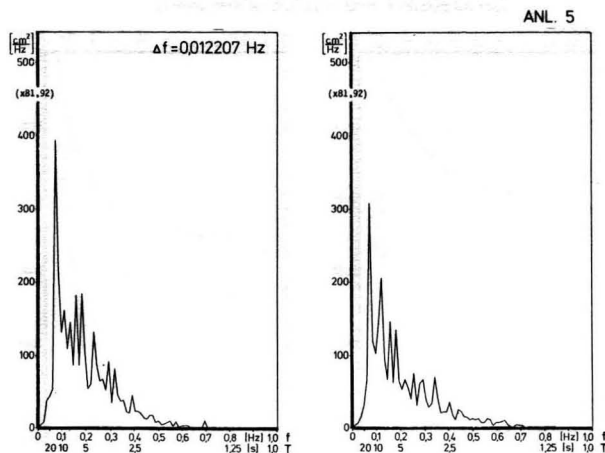


POS. 85m II.4

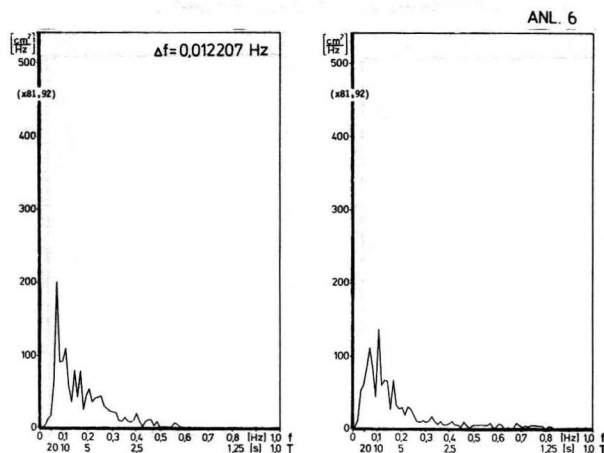


SUMMENHÄUFIGKEITEN DER ENERGIEDICHTE

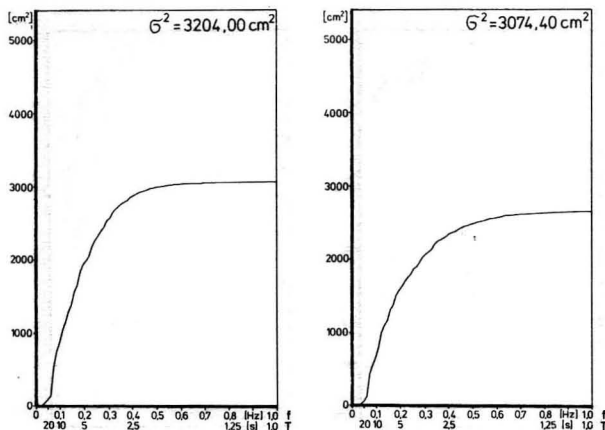
SUMMENHÄUFIGKEITEN DER ENERGIEDICHTE



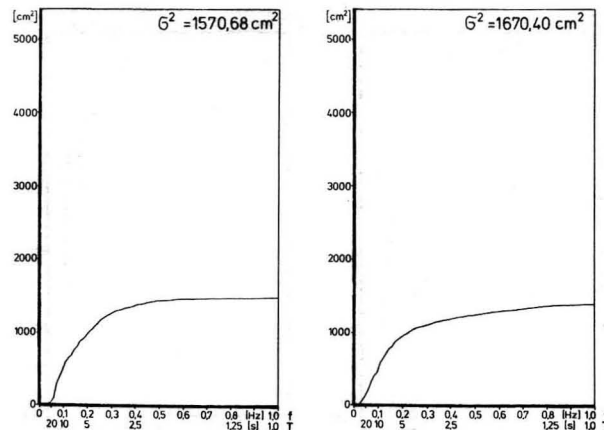
POS. 100m I.5 13.12.1973 ENERGIESPEKTREN 18⁴⁸ POS. 85m II.5



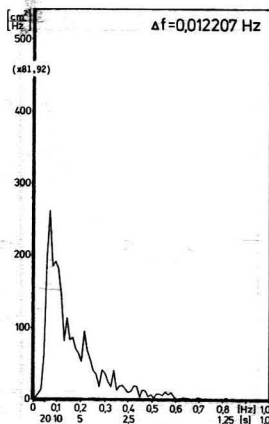
POS. 100m I.6 13.12.1973 ENERGIESPEKTREN 20⁴⁸ POS. 85m II.6



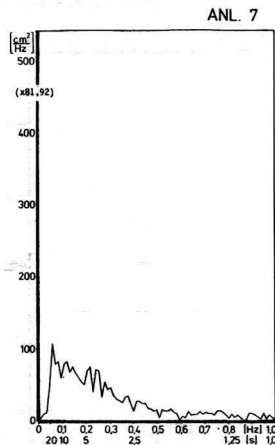
SUMMENHÄUFIGKEITEN DER ENERGIEDICHTE



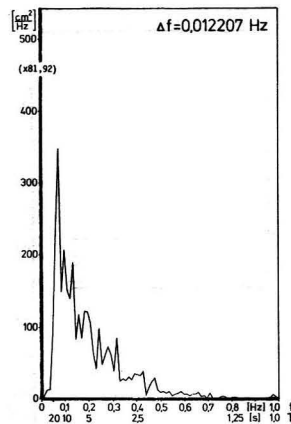
SUMMENHÄUFIGKEITEN DER ENERGIEDICHTE



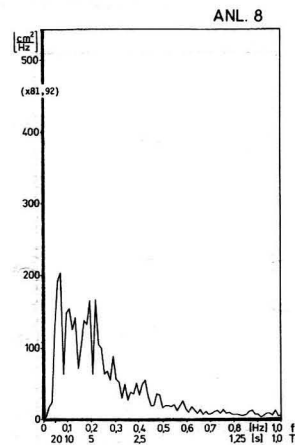
POS. 100m I.7 13.12.1973 ENERGIESPEKTREN 22¹⁸



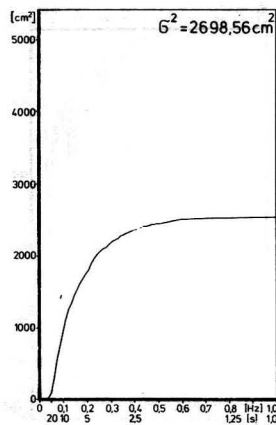
POS. 85m II.7



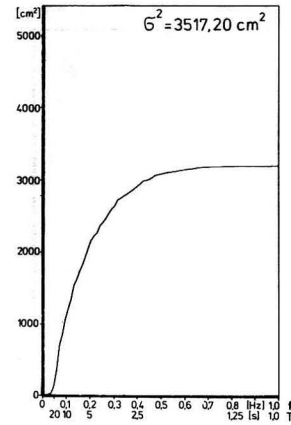
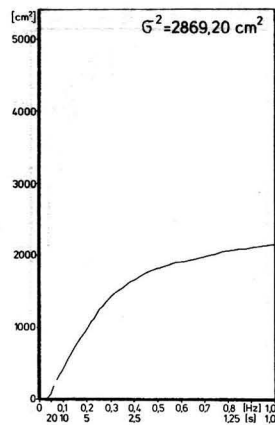
POS. 100m I.8 13.12.1973 ENERGIESPEKTREN 23⁴⁸



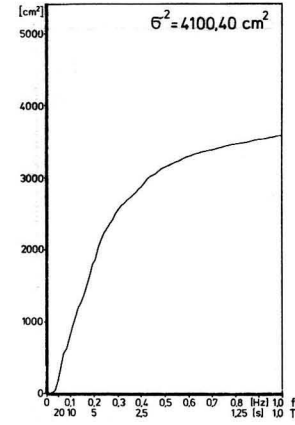
POS. 85m II.8

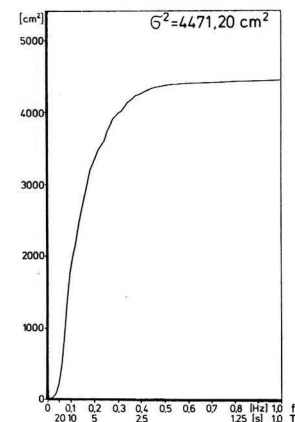
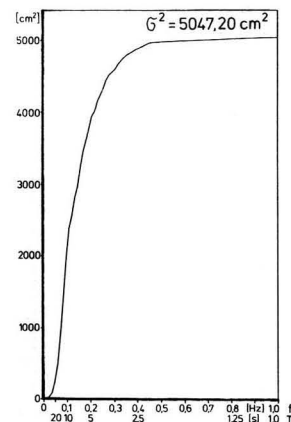
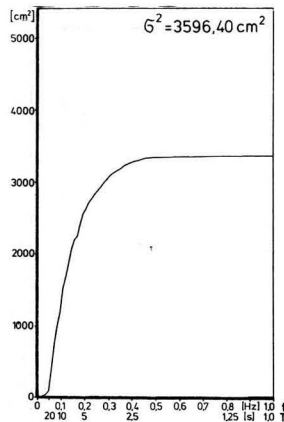
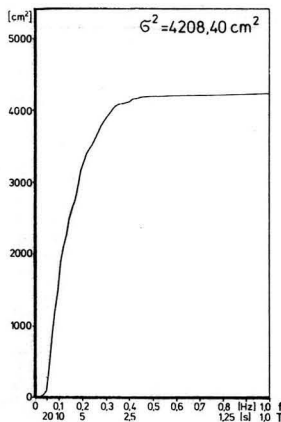
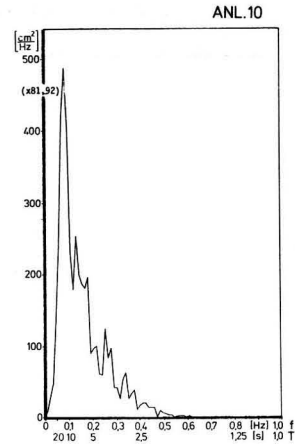
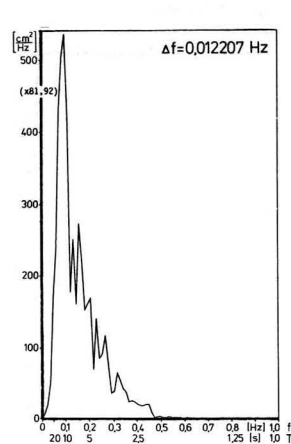
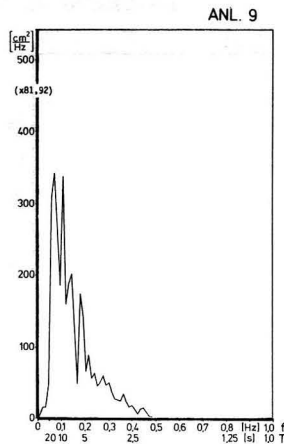
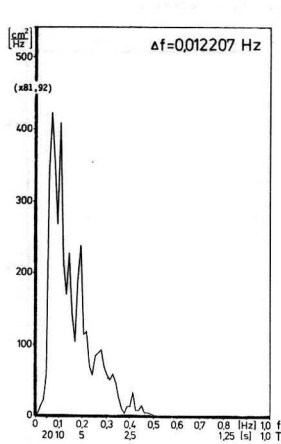


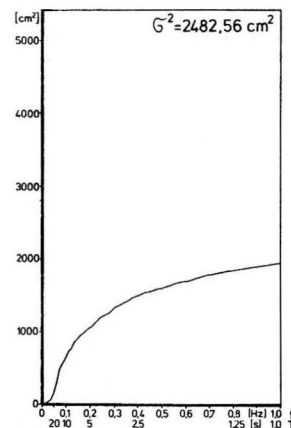
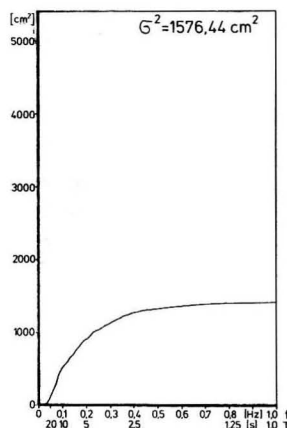
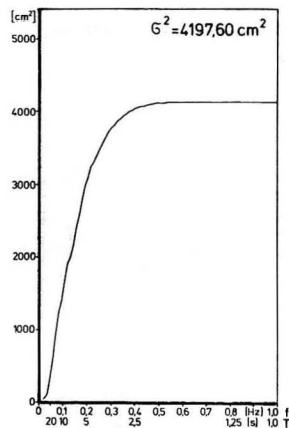
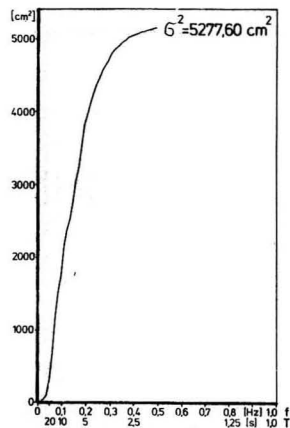
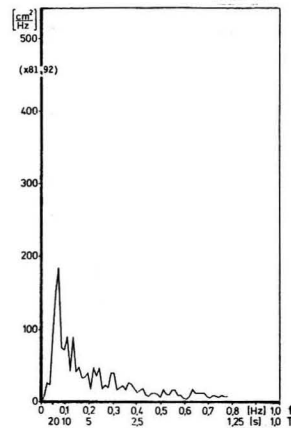
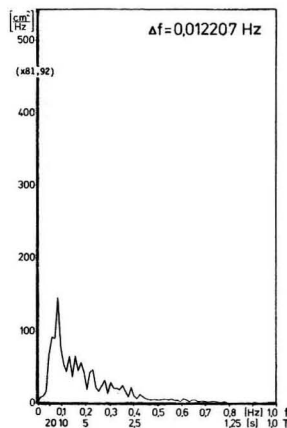
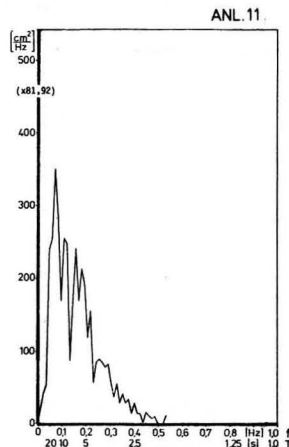
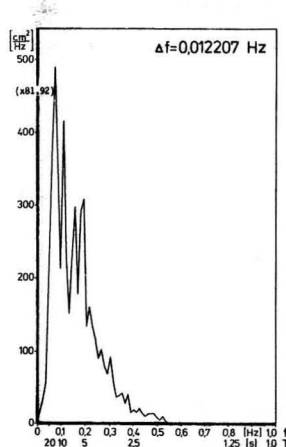
SUMMENHÄUFIGKEITEN DER ENERGIEDICHTE



SUMMENHÄUFIGKEITEN DER ENERGIEDICHTE

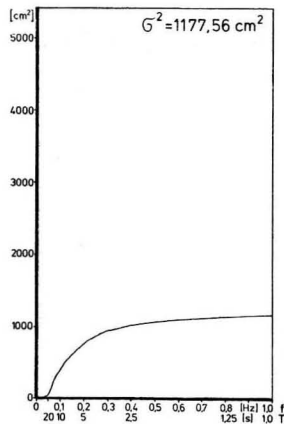
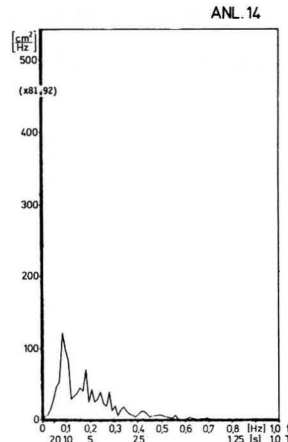
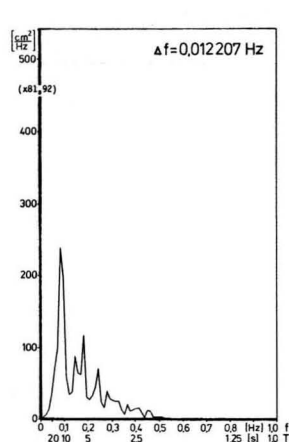
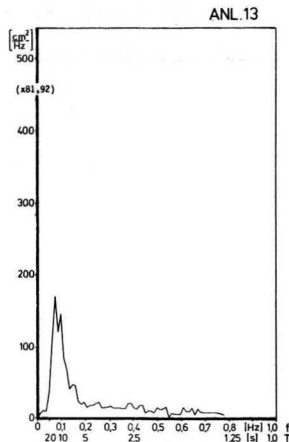
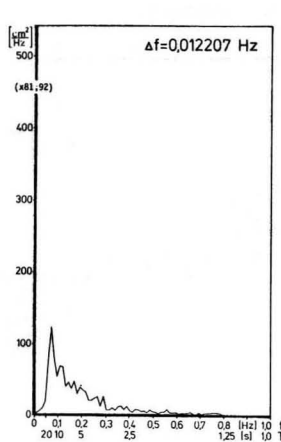




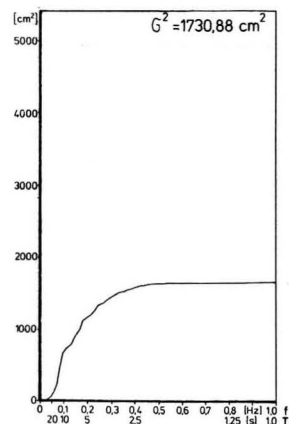
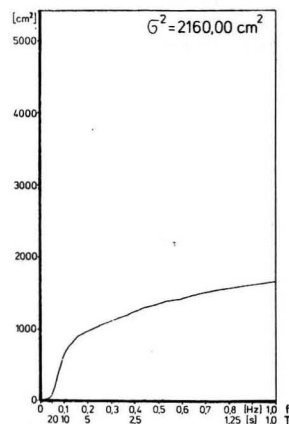


SUMMENHÄUFIGKEITEN DER ENERGIEDICHTE

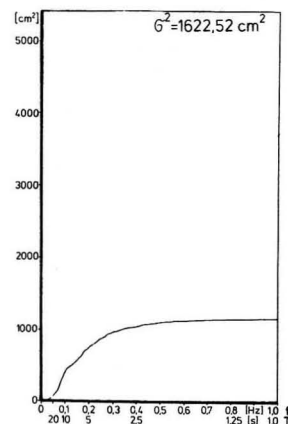
SUMMENHÄUFIGKEITEN DER ENERGIEDICHTE

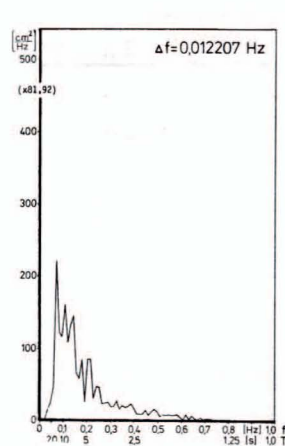


SUMMENHÄUFIGKEITEN DER ENERGIEDICHTE

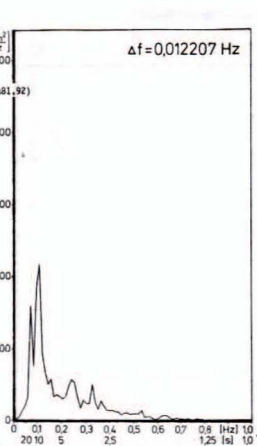
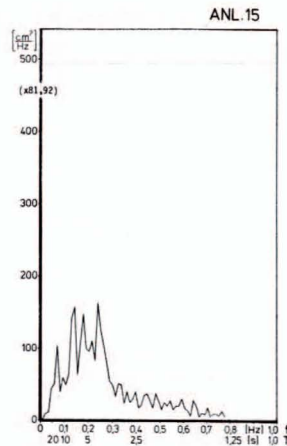


SUMMENHÄUFIGKEITEN DER ENERGIEDICHTE

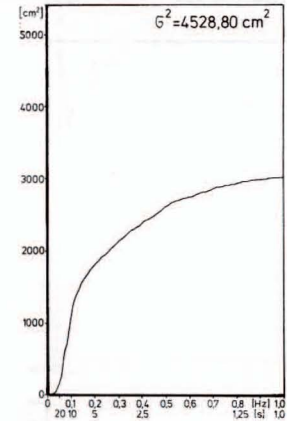
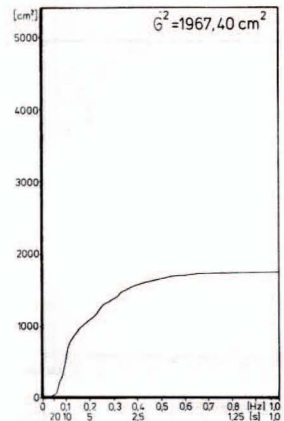
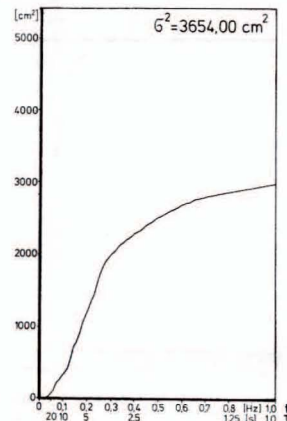
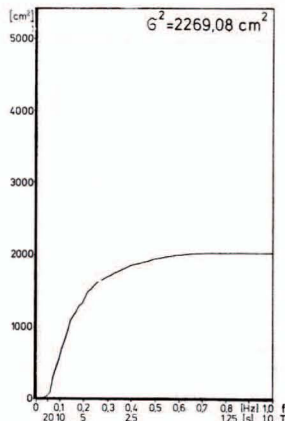




POS. 100m I15 14.12.1973 ENERGIESPEKTREN 15²⁶ POS. 85m II15



POS. 100m I16 14.12.1973 ENERGIESPEKTREN 18²⁵ POS. 85m II16



SUMMENHÄUFIGKEITEN DER ENERGIEDICHTE

SUMMENHÄUFIGKEITEN DER ENERGIEDICHTE